

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«МИРЭА – Российский технологический университет»
РТУ МИРЭА»**

ЛЕКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

**Конфиденциальная информация и ее защита в документационном
обеспечении управления
Электроника**

**Уровень бакалавриат
Форма обучения очная**

**Направление
подготовки 10.03.01 Информационная безопасность**

Институт комплексной безопасности и специального приборостроения

Кафедра кафедра электроники

Лектор д.т.н., профессор Филинов В.В.

Используются в данной редакции с учебного года 2020/21

Проверено и согласовано «_____» _____ 20__ г.
*(подпись директора Института Филиала
с расшифровкой)*

Москва 2020г.

3. ОСНОВЫ ЦИФРОВОЙ СХЕМОТЕХНИКИ

3. 1. Общие сведения

В современной информационной электронике импульсный принцип построения систем занимает доминирующее положение по сравнению с аналоговым принципом. На базе импульсной техники выполняются системы управления и регулирования, устройства измерения и отображения информации. На ней основана цифровая вычислительная техника.

В отличие от аналоговых систем, в которых сигналы изменяются непрерывно во времени (например, напряжение изменяется пропорционально регулируемой температуре), в импульсных системах используются сигналы (напряжение, ток) импульсной формы.

1. В импульсном режиме может быть достигнута значительная мощность во время действия импульсов при малом значении средней (за период их повторения) мощности устройства. Очевидно, это преимущество проявляется сильнее при уменьшении длительности импульсов по отношению к периоду их повторения. В результате габариты и масса электронной аппаратуры, определяемые в основном средней мощностью, при использовании импульсного режима могут быть существенно снижены.

2. Импульсный режим позволяет ослабить влияние температуры и разброса параметров полупроводниковых приборов на работу устройств. Это объясняется уменьшением энергии, выделяемой в элементах импульсного устройства. Разброс параметров не отражается существенно на работе импульсных устройств в связи с тем, что полупроводниковые приборы в них работают, как правило, в ключевом режиме, предполагающем два крайних состояния: “Включено” – “Выключено”.

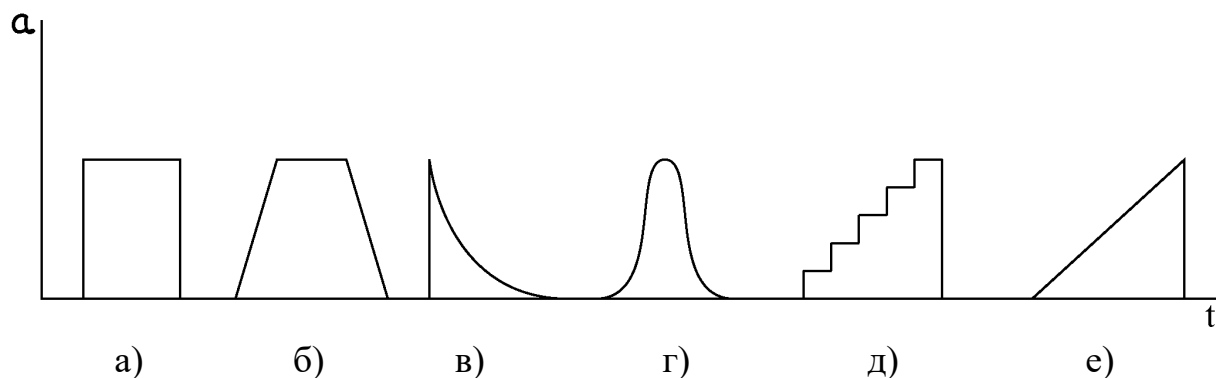


Рис. 3.1. Форма видеоимпульсов:

а – прямоугольный, б – трапецеидальный, в – экспоненциальный,
г – колоколообразный, д – ступенчатый, е – пилообразный

3. Импульсный режим позволяет значительно повысить пропускную способность и помехоустойчивость электронной аппаратуры. Пропускная способность – возможная наибольшая скорость передачи информации, а помехоустойчивость – способность аппаратуры правильно функционировать в условиях действия помех. Сигналы импульсных устройств дискретны и представляются комбинацией стандартных импульсов, поэтому скорость

передачи таких сигналов выше, чем непрерывных. Выше и помехоустойчивость, так как искажение параметров импульсов (например, амплитуды) помехами не искажает информацию, заключенную в определенном сочетании импульсов.

4. Для реализации импульсных устройств, даже сложных (например, вычислительных машин), требуется большое число сравнительно простых однотипных элементов, легко выполняемых методами интегральной технологии. Это позволяет повысить надежность, уменьшить габариты и массу электронной аппаратуры.

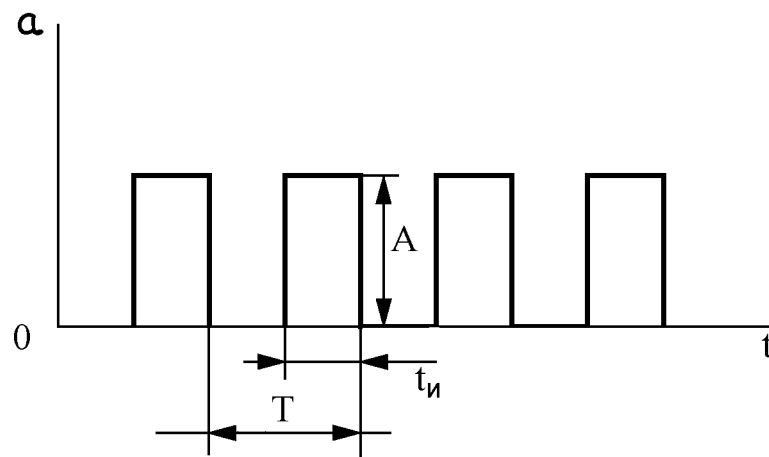


Рис. 3.2. Периодические импульсы

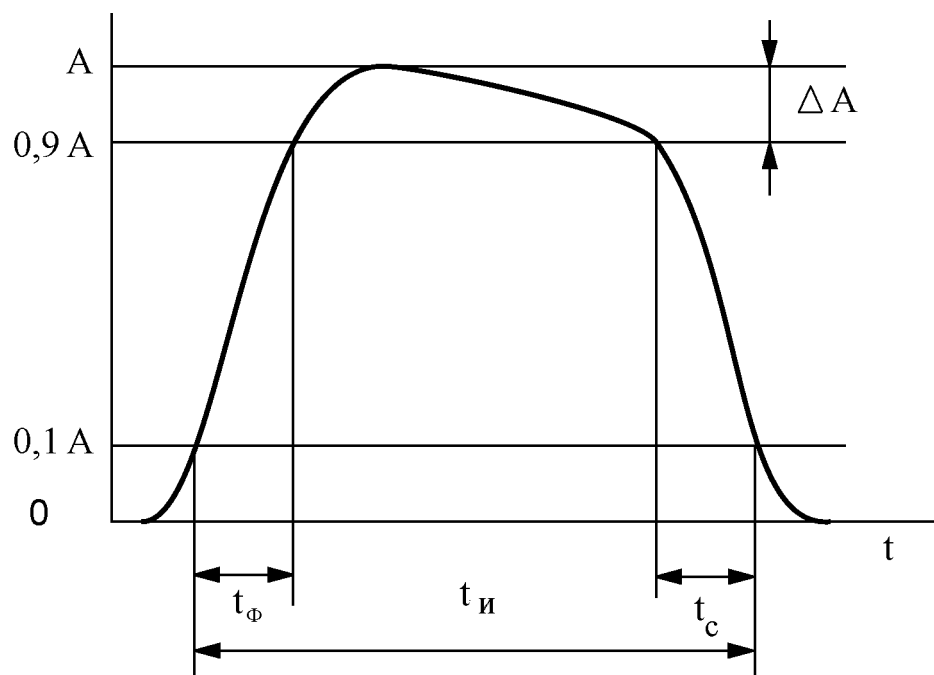


Рис. 3.3. Параметры реальных импульсов

Импульсные устройства широко распространены в вычислительной технике, радиолокации, телевидении, автоматике, промышленной электронике. Переход к дискретному представлению сигналов в виде сочетания импульсов в измерительной технике позволил резко повысить

точность измерительных приборов. Импульсный режим работы лежит в основе современных быстродействующих цифровых вычислительных машин. Мощные импульсы передатчиков излучаются антеннами радиолокаторов, а слабые, отраженные от различных объектов импульсы, принимаются и обрабатываются приемниками, причем импульсный режим позволяет выделять сигналы, амплитуда которых значительно меньше уровня помех.

В импульсной технике применяют, как правило, видеоимпульсы, примеры которых приведены на рис.3.1.

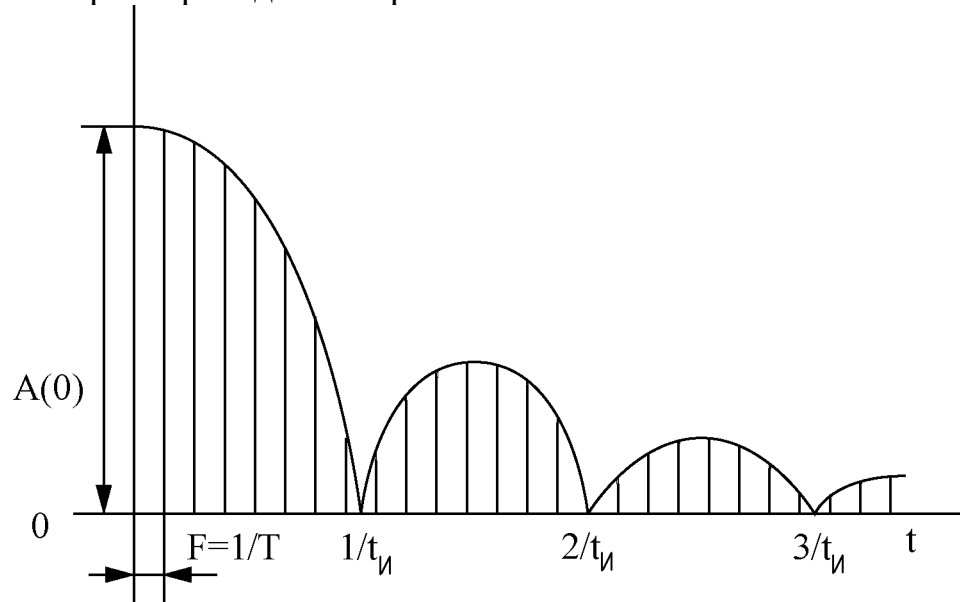


Рис. 3.4. Амплитудный спектр периодических прямоугольных импульсов

Обычно импульсы следуют периодически с периодом T , которому соответствует частота повторения $F=1/T$ (Рис.3.2.). Отношение периода T к длительности $t_{и}$ импульсов называют **скважностью**: $q = T/t_{и}$. Скважность обычно колеблется в пределах от 2 – 10 (автоматика, вычислительная техника) до 10000 (радиолокация). Приведенные на рис. 2. импульсы идеализированы.

Реальные импульсы рис. 3.3. искажены, что выражается обычно в замедлении нарастания и убывания импульса, а также в спаде его плоской вершины. Это связано с наличием переходных процессов в п-р переходах, реализующих импульсный режим работы элементов. Реальные импульсы характеризуют следующими основными параметрами (рис.3.3):

амплитудой импульса A ;

длительностью импульса $t_{и}$ обычно определяемой на уровне 0,1 A ;

длительностью фронта импульса $t_{ф}$ – временем нарастания импульса от 0,1 до 0,9 A ;

длительностью среза импульса $t_{с}$ – временем убывания импульса от 0,9 до 0,1 A ;

спадом вершины импульса ΔA .

Для определения полосы пропускания устройств, предназначенных для передачи импульсных сигналов, важно знать спектральный состав этих

сигналов. Периодическую последовательность импульсов характеризуют спектром в виде суммы бесконечно большого числа гармоник. **Амплитудные спектры** – зависимости амплитуд гармоник от частоты – различны для разных форм импульсов, их длительности и периода. На рис.3.4. показан амплитудный спектр периодических прямоугольных импульсов (см. рис.3.2.). Отдельные составляющие спектра отстоят одна от другой по оси частот на величину частоты повторения $F=1/T$. Поэтому спектр содержит постоянную составляющую $A(0)$ и амплитуды гармоник с частотами, кратными F . Другие составляющие спектра отсутствуют. Такой спектр называют **линейчатым** (дискретным). В спектре рис.3.4. отсутствуют также составляющие с частотами, кратными $1/t_{и}$. Спектры характеризуют активной шириной, представляющей собой диапазон частот от $f=0$ до $f_{max}=F_a$, в котором заключено 95% энергии сигнала. Для прямоугольного импульса $F_a=2/t_{и}$. Чтобы импульс почти не искажался при передаче через электрическую цепь (например, через усилитель), нужно обеспечить ширину полосы пропускания цепи не менее F_a . Таким образом, для неискаженной передачи прямоугольного импульса требуется полоса $2/t_{и}$. Например, для прямоугольного импульса длительностью $t_{и} = 1\text{ мкс}$ необходима полоса пропускания $\Delta f = 2/t_{и} = 2/10^{-6} = 2\text{ МГц}$. Заметим, что ширина полосы пропускания, обеспечивающая неискаженную передачу, не зависит от частоты повторения импульсов при постоянной их длительности.

3.2. Электронные ключи и простейшие формирователи импульсов

В состав многих импульсных устройств входят **электронные ключи**. Основу любого электронного ключа составляет активный элемент (полупроводниковый диод, транзистор, операционный усилитель), работающий в ключевом режиме. Ключевой режим характеризуется двумя состояниями ключа: “Включено” – “Выключено”. На рис.3.5., а – в приведены упрощенная схема и временные диаграммы идеального ключа. При разомкнутом ключе $i=0$, $u_{вых}=E$, при замкнутом ключе $i=E/R$, $u_{вых}=0$. При этом предполагается, что сопротивление разомкнутого ключа бесконечно велико, а сопротивление замкнутого ключа равно нулю. В реальных ключах токи, а также уровни выходного напряжения, соответствующие состояниям “Включено” – “Выключено”, зависят от типа и параметров применяемых активных элементов и переход из одного состояния в другое происходит не мгновенно, а в течение времени, обусловленного инерционностью активного элемента и наличием паразитных емкостей и индуктивности цепи. Качество электронного ключа определяется следующими основными параметрами:

- падением напряжения на ключе в замкнутом состоянии u_z ;
- током через ключ в разомкнутом состоянии i_p ;

- временем перехода ключа из одного состояния в другое (временем переключения) $t_{\text{пер}}$.

Чем меньше значения величин U , i_p и $t_{\text{пер}}$, тем выше качество ключа.

Простейший тип электронных ключей – диодные ключи. В качестве активных элементов в них используют полупроводниковые или

электровакуумные

диоды. На рис.3.6,а - приведена схема

последовательного

диодного ключа, а на

рис.6,б – его

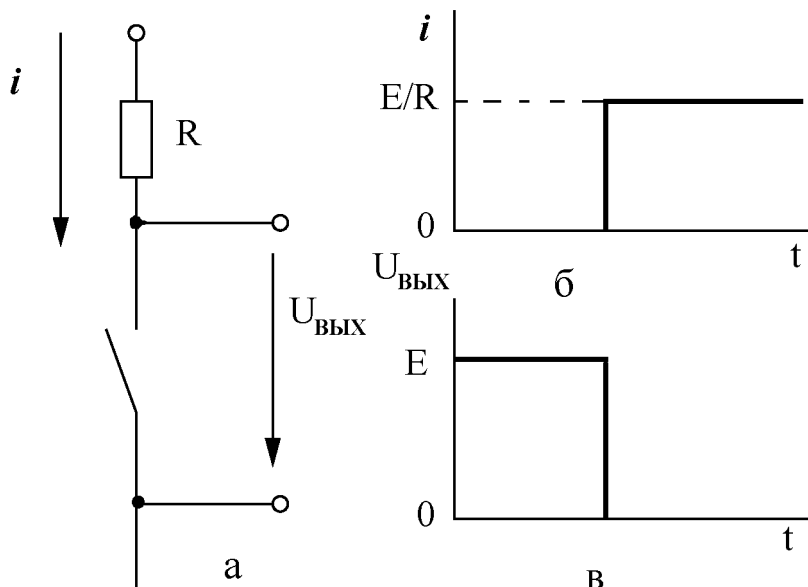


Рис. 3.5. Схема (а), временные диаграммы тока (б) и выходное напряжение – в идеального ключа

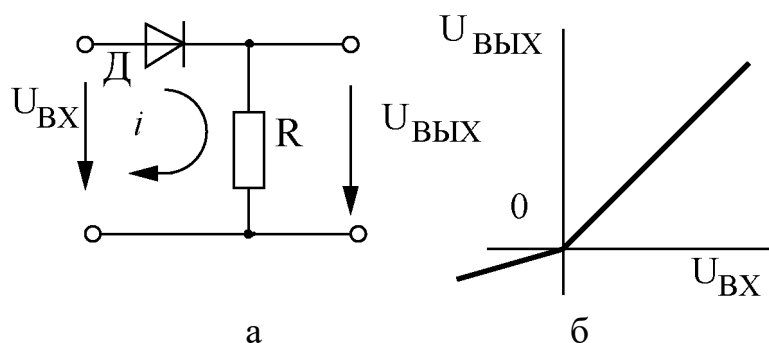


Рис. 3.6. Схема (а) и передаточная характеристика (б) последовательного диодного ключа с нулевым уровнем включения.

передаточная характеристика. При положительном входном напряжении диод открыт и ток через него

$$i = \frac{U_{\text{вх}}}{R + R_{\text{пр}}},$$

$R_{\text{пр}}$ – прямое сопротивление диода.

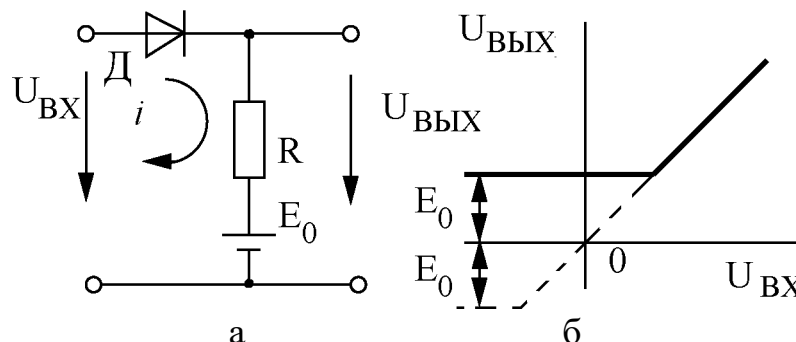


Рис. 3.7. Схема (а) и передаточные характеристики (б) последовательного двоичного ключа с ненулевым уровнем включения.

Выходное напряжение

$$U_{\text{ВЫХ}} = Ri = \frac{RU_{\text{ВХ}}}{R_{\text{пр}} + R}$$

Обычно $R_{\text{пр}} \ll R$, тогда $U_{\text{ВЫХ}} \approx U_{\text{ВХ}}$. При входном отрицательном напряжении обратный ток через диод

$$i = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_{\text{обр}} + R},$$

где $R_{\text{обр}}$ – обратное сопротивление диода.

При этом выходное напряжение

$$U_{\text{ВЫХ}} = Ri = R \left(\frac{U_{\text{ВХ}}}{R_{\text{обр}} + R} \right).$$

Как правило, $R_{\text{обр}} \gg R$ и $U_{\text{ВЫХ}} \approx R(U_{\text{ВХ}}/R_{\text{обр}}) \ll U_{\text{ВХ}}$. При изменении полярности включения диода график функции $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$ повернется на угол π вокруг начала координат. Схеме рис.3.6,а соответствует **нулевой уровень включения** (уровень входного напряжения, определяющий отпирание или запираание диода). Для изменения уровня включения в цепь ключа вводят источник напряжения смещения E_0 (рис.3.7,а). В этом случае при $U_{\text{ВХ}} > E_0$ диод открыт и $U_{\text{ВЫХ}} \approx U_{\text{ВХ}}$, а при $U_{\text{ВХ}} < E_0$ – закрыт и $U_{\text{ВЫХ}} = E_0$ (рис.3.7,б). Если изменить полярность источника E_0 , то график функции $U_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ}})$ приобретет вид, показанный на рис.3.7,б – пунктирной линией.

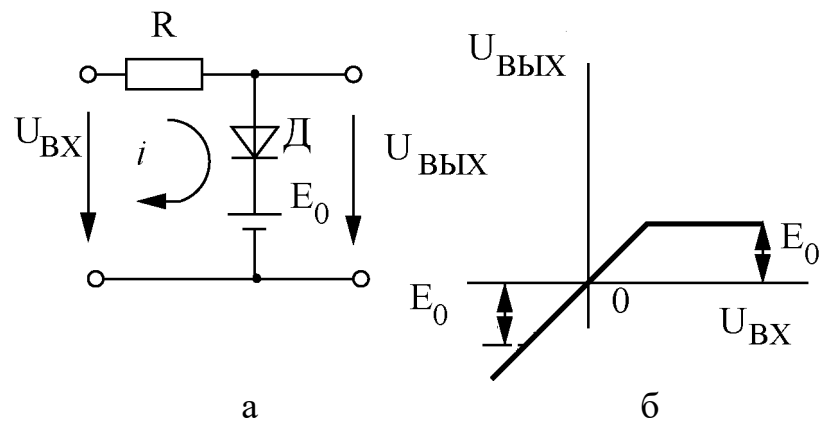
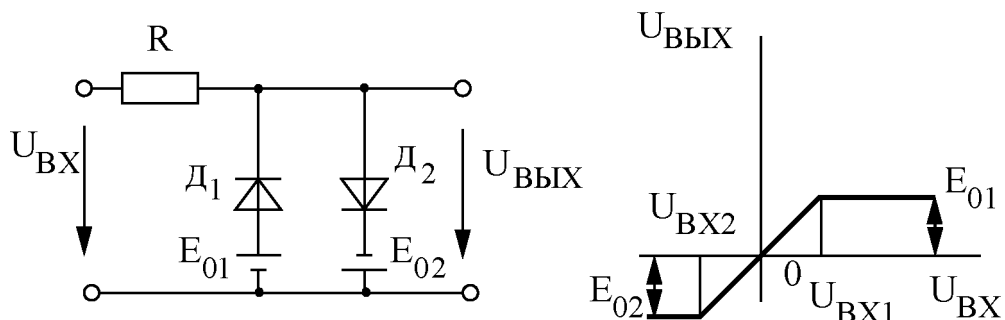


Рис. 3.8. Схема (а) и передаточные характеристики (б) параллельного диодного ключа с ненулевым уровнем включения.



а

б

Рис.3.9.Схема (а) и передаточная характеристика (б) двойного диодного ключа.

Используя выше приведенный принцип анализа работы диодных ключей можно построить различные ключевые схемы. Для примера на рис.3.8 и 3.9 приведены схемы и передаточные характеристики параллельного и двойного диодных ключей. Диодные ключи не позволяют электрически разделить управляющую и управляемую цепи, что часто требуется на практике. В этих случаях используют **транзисторные ключи**. На рис.3.10,а приведена схема ключа на биполярном транзисторе. Входная (управляющая) цепь отделена от выходной (управляемой) цепи. Ключ мало отличается от усилителя, выполненного по схеме с общим эмиттером. Однако транзистор работает в **ключевом режиме**, характеризуемом двумя состояниями. Первое состояние определяется точкой A_1 на выходных характеристиках транзистора; его называют **режимом отсечки**. В режиме отсечки ток базы $I_b=0$, коллекторный ток I_{k1} равен начальному коллекторному току, а коллекторное напряжение $U_n=U_{k1}\approx E_k$ (рис.3.10,б). Режим отсечки реализуется при отрицательных потенциалах базы. Второе состояние определяется точкой A_2 и называется **режимом насыщения**. Он реализуется при положительных потенциалах базы. При этом ток базы определяется в основном сопротивлением резистора R_6 и $I_{b2}=U_{вх} / R_6$, поскольку сопротивление открытого эмиттерного перехода мало. Коллекторный переход также открыт, и ток коллектора $I_{k2}\approx E_k/R_k$, а коллекторное напряжение $U_{k2}\approx 0$. Из режима отсечки в режим насыщения транзистор переводится воздействием положительного входного напряжения. При этом повышению входного напряжения (потенциала базы) соответствует понижение входного напряжения (потенциала коллектора), и наоборот. Такой ключ называют **инвертирующим** (инвертором). В рассмотренном транзисторном ключе уровни выходного напряжения, соответствующие режимам отсечки и насыщения, стабильны и почти не зависят от температуры.

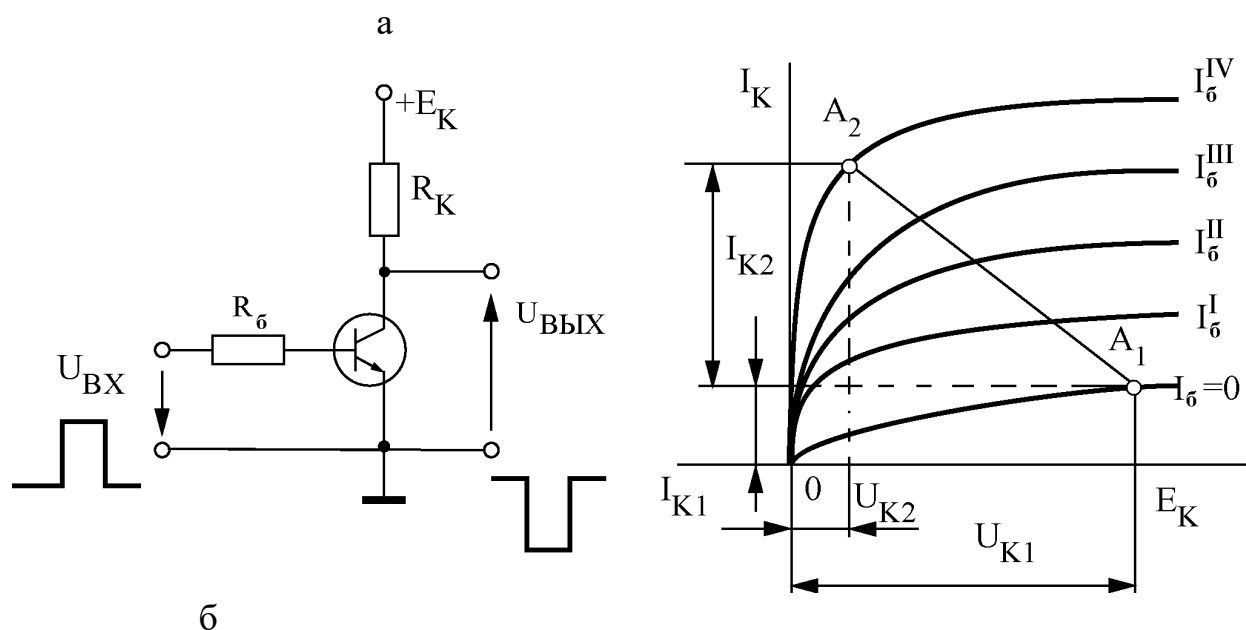


Рис. 3.10. Схема (а) и характеристики режима работы (б) ключа на биполярном транзисторе

Существуют также **повторяющие** ключи, у которых понижению входного напряжения соответствует понижение выходного напряжения. Повторяющий ключ выполняют по схеме эмиттерного повторителя.

Время переключения ключей на биполярных транзисторах, также как диодных ключей, определяется постоянной времени переходного процесса

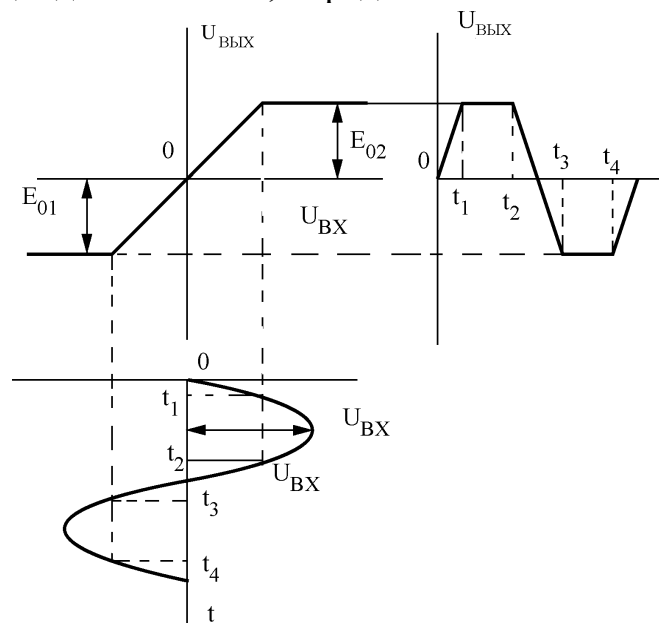


Рис. 3.11. Диаграммы, поясняющие работу двустороннего ограничителя

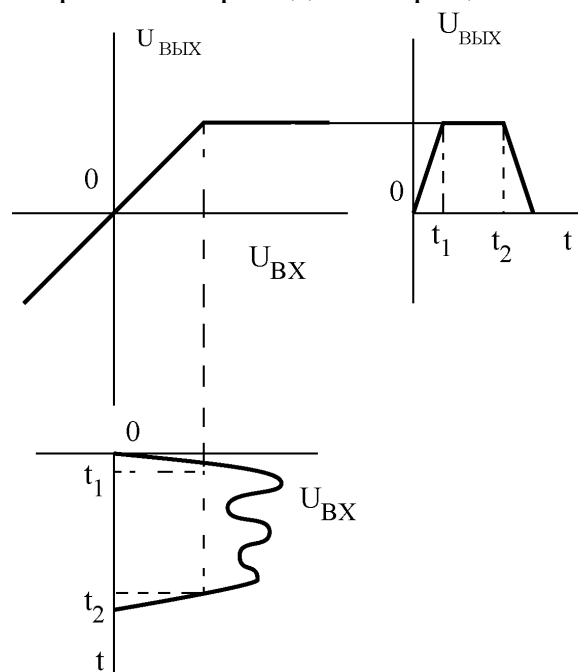
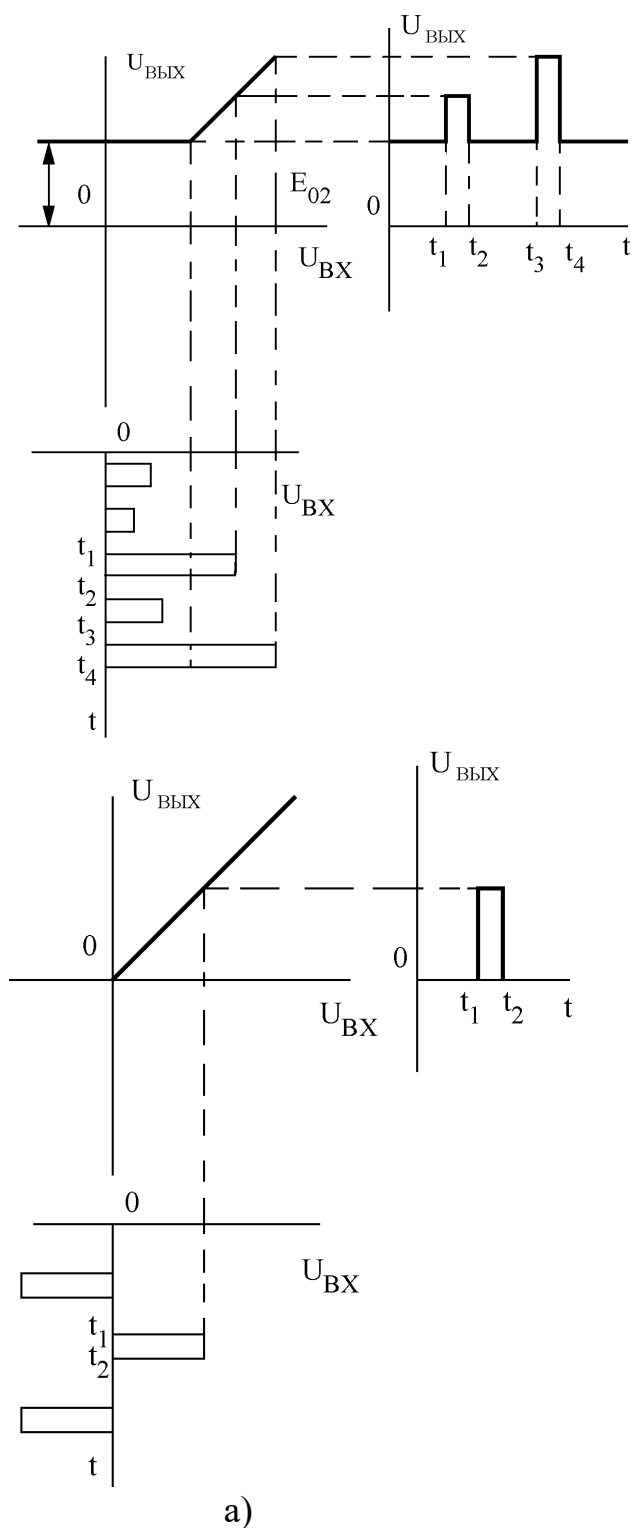


Рис. 3.12. Сглаживание вершин импульсов с помощью ограничителя сверху



а) б

Рис. 3.13. Выделение импульсов с помощью ограничителей:
(а) по амплитуде, (б) по полярности

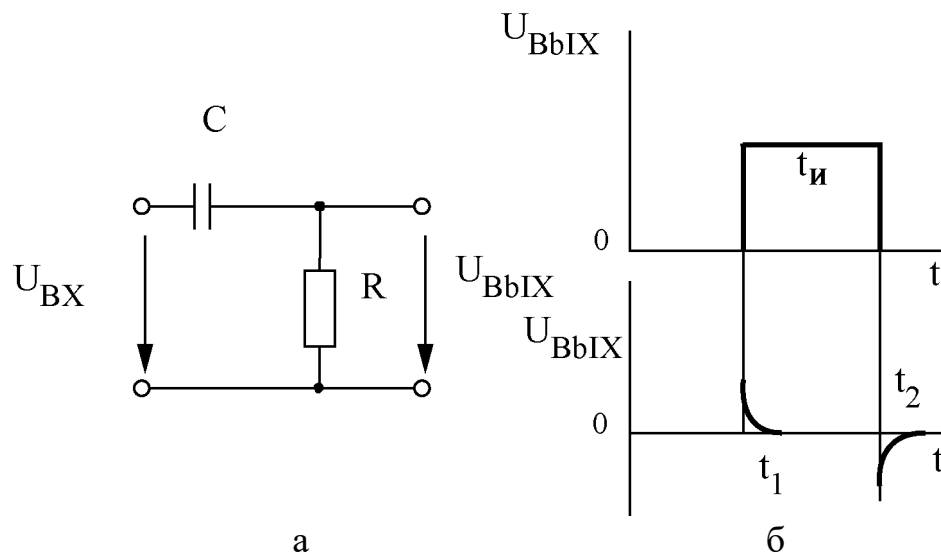


Рис. 3.14. Схема (а) и диаграммы работы (б) дифференцирующей цепи.

при включении и выключении р-п-переходов и зависит от их емкости и величины сопротивлений, определяемых технологиями производства элементов ключей. Для повышения быстродействия и входного сопротивления применяют ключи на полевых транзисторах.

Электронные ключи часто используют в устройствах **формирования импульсов**. Для примера: на рис.3.11. приведена диаграмма поясняющая использование двойного диодного ключа рис.3.9. для преобразования сигналы близкие к прямоугольной форме; на рис.3.12. приведена диаграмма, поясняющая использование параллельного ключа рис.3.8. для сглаживания вершины импульса; на рис.3.13 а и б приведены диаграммы, поясняющие использование ключей для выделения сигналов по амплитуде и полярности. В импульсной технике для формирования импульсов совместно с электронными ключами широко используют дифференцирующие и интегрирующие RC-цепи. Для формирования коротких импульсов служат дифференцирующая цепь – рис.14 а, использование которой преобразует импульс большой длительности в короткие импульсы рис.3.14 б, позволяющие ускорить запуск работы импульсных устройств.

3.3. Импульсный режим работы операционных усилителей

Интегральные операционные усилители (ОУ) находят широкое применение в импульсной технике. Передаточная характеристика ОУ имеет вид рис.3.15, соответствующий передаточной характеристике двойного ключа рис.3.9. Уровни входного сигнала ОУ в импульсном режиме работы превышают значения, соответствующие линейной области амплитудной характеристики (см. рис.3.15). В связи с этим выходное напряжение ОУ в процессе работы определяется либо напряжением $U_{\text{вых max}}^+$ либо $U_{\text{вых max}}^-$.

Работу ОУ в импульсном режиме рассмотрим на примере **компаратора**, осуществляющего сравнение измеряемого входного напряжения ($u_{\text{вх}}$) с опорным напряжением ($U_{\text{оп}}$) рис.3.16. Опорное напряжение представляет

собой неизменное по величине напряжение положительной или отрицательной полярности, входное напряжение изменяется во времени. При достижении

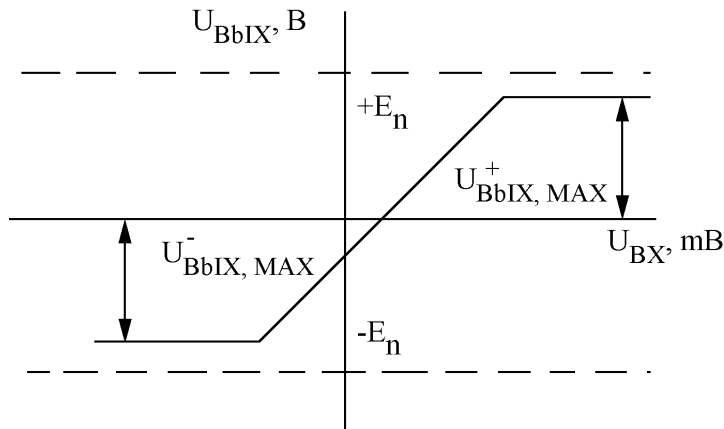


Рис. 3.15. Передаточная характеристика ОУ

$U_{оп}=U_0 \approx 0$.

входным напряжением уровня опорного напряжения происходит изменение полярности напряжения на выходе ОУ, например с $U_{вых}^+$ на $U_{вых}^-$. При $U_{оп}=0$ компаратор осуществляет фиксацию момента перехода входного напряжения через нуль. Компаратор часто называют нуль – органом, поскольку его переключение происходит при $U_{вх}-$

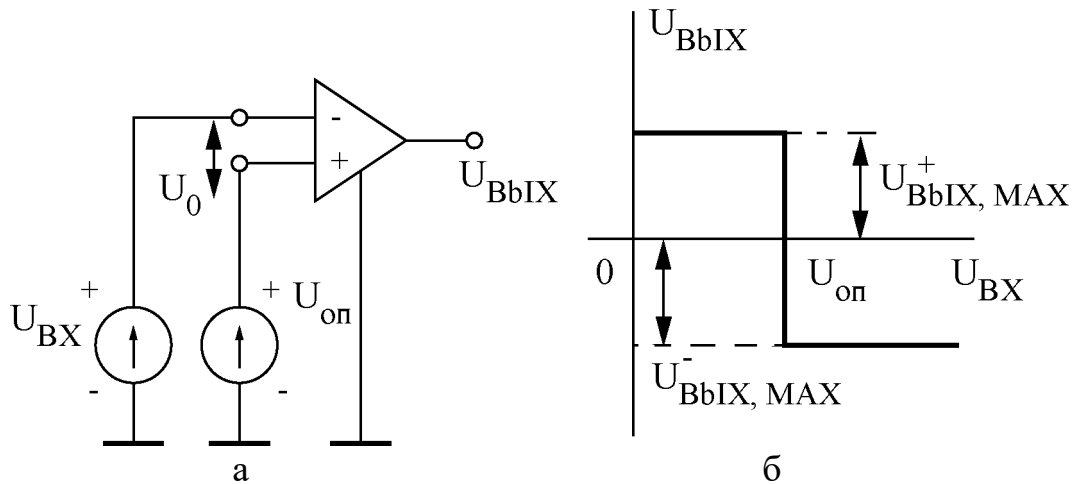


Рис. 3.16. Схема компаратора на операционном усилителе (а), его передаточная характеристика (б)

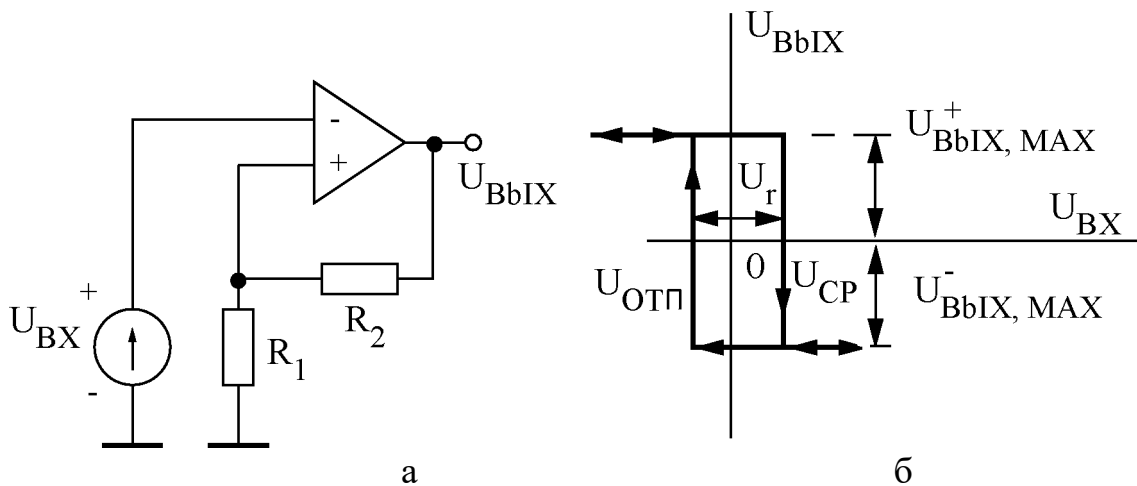


Рис. 3.17. Схема компаратора с положительной обратной связью и нулевым опорным напряжением (а), его передаточная характеристика (б).

Компараторы нашли применение в системах автоматического управления и в измерительной технике, а также для построения различных узлов импульсного и цифрового действия (в частности, аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей).

Широкое применение получил также компаратор, в котором ОУ охвачен положительной обратной связью. Осуществляемой по неинвертирующему входу с помощью резисторов R_1, R_2 (рис.3.17,а). Такой компаратор обладает передаточной характеристикой с гистерезисом и имеет два устойчивых состояния равновесия напряжений U^+ и U^- (рис.3.17,б). Схема известна под названием **триггер Шмитта** или порогового устройства.

Переключение схемы в состояние $U_{\text{вых max}}^-$ происходит при достижении $U_{\text{вх}}$ напряжения (порога) **срабатывания** $U_{\text{ср}}$, а возвращение в исходное состояние $U_{\text{вых}}=U_{\text{вых max}}^+$ при снижении $U_{\text{вх}}$ до напряжения (порога) **отпускания** $U_{\text{отп}}$. Значения пороговых напряжений находят по схеме, положив $U_{\text{оп}}=0$:

$$U_{\text{ср}} = \frac{+ (U_{\text{вых max}}^+ - U_{\text{оп}}) \cdot R_1}{R_1 + R_2}, \quad U_{\text{отп}} = \frac{-(U_{\text{вых max}}^- + U_{\text{оп}}) \cdot R_1}{R_1 + R_2},$$

откуда ширина зоны гистерезиса

$$U_{\text{г}} = U_{\text{ср}} - U_{\text{отп}} = \frac{R_1}{(R_1 + R_2) \cdot (U_{\text{вых max}}^+ + U_{\text{вых max}}^-)}.$$

Пороговые напряжения и зона гистерезиса (рис.3.17, б) составляют:

$U_{\text{ср}} = \chi U_{\text{вых max}}^+$, $U_{\text{отп}} = -\chi U_{\text{вых max}}^-$ и $U_{\text{г}} = \chi (U_{\text{вых max}}^+ + U_{\text{вых max}}^-)^{-1}$, где $\chi = R_1 / (R_1 + R_2)$.
Схема рис.3.17, а служит основой при построении генераторов импульсов на ОУ.

Триггер Шмитта лежит в основе работы генераторов прямоугольных импульсов. Для получения прямоугольных импульсов широко используют устройства, называемые **релаксационными генераторами (релаксаторами)** (от англ. relax – ослаблять, уменьшать напряжение) или **мультивибраторами**. Они могут работать в одном из трех режимов: 1) автоколебаний; 2) ждущем; 3) синхронизации. На практике чаще применяют устройства, основанные на использовании первых двух режимов.

Автоколебательный мультивибратор предназначен для генерирования прямоугольных импульсов напряжения. Он обладает двумя не устойчивыми состояниями, работает в режиме самовозбуждения и не требует внешнего входного сигнала. В мультивибраторе обычно используют ОУ с положительной обратной связью и время задающей RC цепью, подключенной к инвертирующему входу. Работа автоколебательного мультивибратора рис.3.18, а обеспечивается цепью положительной ОС, приводящей к лавинообразному переходу схема из одного состояния в другое, и цепью отрицательной обратной связи, определяющей период возникающих

колебаний. Когда потенциал на входе “-” мультивибратора достигнет значения $-U_{\text{ВЫХ}}R_1/(R_1+R_2)$, устройство переключается и его выходное напряжение скачком изменяет свое значение с $-U_{\text{ВЫХ}}$ до $+U_{\text{ВЫХ}}$. При этом потенциал на инвертирующем входе устройства начинает изменяться в противоположную сторону, пока не достигнет значения $+U_{\text{ВЫХ}}R_1/(R_1+R_2)$. Автоколебательный мультивибратор переключается в первоначальное состояние (рис.3.18,б). Частота колебаний выходного напряжения мультивибратора определяется соотношением:

$$f=1/2RC \cdot \ln(1+2R_1/R_2).$$

Ждущий мультивибратор (одновибратор) формирует на выходе прямоугольный импульс напряжения определенной длительности при воздействии на вход схемы короткого запускающего импульса. В отличие от автоколебательного мультивибратора ждущий мультивибратор содержит дополнительно цепь, обеспечивающую одно устойчивое состояния равновесия электрического состояния схемы.

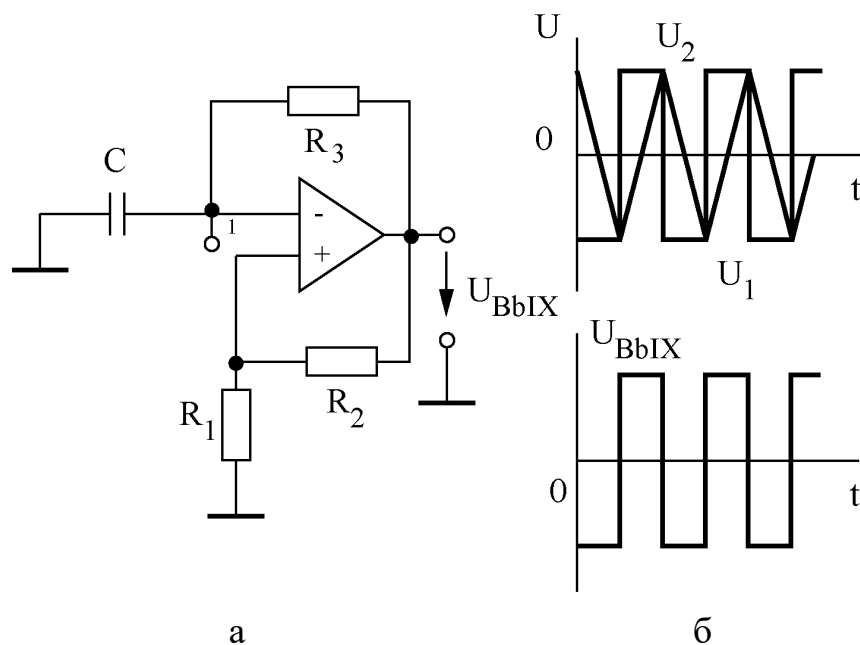


Рис. 3.18. Схема автоколебательного мультивибратора (а) и диаграмма напряжений (б).

Важнейшим показателем операционных усилителей, работающих в импульсном режиме, является их **быстродействие**, которое оценивается **задержкой срабатывания и временем нарастания выходного напряжения**. Задержка срабатывания (время задержки выходного импульса) ОУ общего применения составляет единицы микросекунд, а время нарастания выходного напряжения – доли микросекунд.

Лучшим быстродействием обладают специализированные ОУ, предназначенные непосредственно для импульсного режима работы и получившие общее название «компараторы». Задержка срабатывания таких микросхем составляет менее 1 мкс, а время нарастания – сотые доли микросекунды. Более высокое быстродействие достигается, в частности, за

счет применения высокочастотных интегральных транзисторов и исключения режима их насыщения в схеме ОУ.